

〈 논문 〉

연소실 압력변동을 이용한 저 NOx 연소의 새로운 접근

김종률* · 최경민* · 김덕줄**

(2005년 5월 18일 접수, 2005년 9월 16일 심사완료)

New Approach to Low NOx Combustion by Changing Combustor Pressure

Jong Ryul Kim, Gyung-Min Choi and Duck-Jool Kim

Key Words: Low NOx(저NOx), Changing Combustor Pressure(연소실 압력변동), Combustion Control(연소제어), Partially Premixed Flame(부분예혼합화염)

Abstract

In this study, the influence of changing combustor pressure on nitric oxide emission was investigated. Expansion of reaction region was more clear in the $P^* < 1$ conditions compared to the $P^* \geq 1$ conditions, and it could be observed that flames are distinct in the $P^* \geq 1$ conditions and that brightness is relative low and wide distribution is shown in the $P^* < 1$ conditions. In the respect of temperature distribution, narrow and high-temperature region was shown in the $P^* \geq 1$ conditions. On the other hands, overall uniform temperature distributions were shown in the $P^* < 1$ conditions. Nitric oxide emission decreased with decreasing combustor pressure. This tendency was explained by the mean flame temperature distribution. Low NOx combustion is ascribed to wide-spread reaction region in the low combustor pressure and oscillation were shown $P^* \leq 0.97$, and strength and sizes of oscillation were more increased with lower pressure index. These results demonstrate that flame shape and nitric oxide emission can be controlled with changing combustor pressure.

기호설명

- ϕ : 당량비(Equivalence ratio)
- P^* : 압력지수(Pressure index)
- P_{abs} : 절대압력(Absolute pressure)
- P_{atm} : 대기압(Atmospheric pressure)
- U^* : 속도지수(Velocity index)
- U_M : 혼합기 유속(Mixture velocity)
- U_S : 주위공기류 유속(Surrounding air velocity)

1. 서론

최근 에너지문제는 환경문제, 경제문제, 사회문제를 동시에 고려해야 한다. 이를 충족시키기 위

해서는 고효율 저공해 연소기 개발이 필수적이다. 에너지 생성 시 배출되는 유해물질은 많은 환경문제를 야기 시키고 있다. 환경문제는 직접적으로 인간의 인체에 위해를 가하므로 큰 비중을 가지고 연구되어야 한다. 특히 질소산화물은 산성비, 스모그 현상의 주요 원인이기 때문에 저 NOx 화를 위한 연소방법의 연구가 필요하다. 저 NOx 연소를 위해서는 연소현상을 적절히 제어하는 방법이 필요하다. 저 NOx 연소 현상을 제어하는 방법은 다양하게 연구되어 왔다. 대표적인 방법으로 희박연소(lean combustion)^(1,2) 연료 및 공기를 단계적으로 나누어 공급하여 완전 연소 시킴으로써 연소효율의 저하 없이 NOx 배출을 저감시키는 방법 (multi-stage combustion)⁽³⁻⁵⁾ 음향가진(acoustic excitation)을 이용하여 확산화염의 유동과 NOx에 대한 제어 연구 방법⁽⁶⁾ 등이 알려져 있다.

한편, 연소실 압력변화도 화염 형상과 배출특성에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 선행연구를 살펴보면, 고압 연소 조건에서 연소

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
부산대학교 기계기술연구소
E-mail : choigm@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2476 FAX : (051)512-5236

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 부산대학교 기계공학부

실 압력이 증가함에 따라 연소 반응율과 온도가 증가하는 관계를 규명한 연구⁽⁷⁾가 수행되었고, 난류화염에서 연소실 압력과 화염구조간의 관계를 해명한 연구⁽⁸⁾도 보고되고 있다. 고온·고압의 조건하에서 다양한 연료에 대해 당량비의 변화에 따른 층류 연소속도계측을 통하여 연소속도 변화를 관찰한 연구^(9,10)가 보고되었고, 모델링을 통하여 고압의 연소 조건에서 질소산화물(nitric oxides)의 생성 기구를 관찰⁽¹¹⁾한 연구도 수행되었다. 그러나 이러한 연구들의 대부분은 대기압 이상의 조건에 국한 되고 압력변동이 배출특성에 미치는 영향을 조사한 연구는 찾아보기 어렵다.

따라서 본 연구에서 연소실 압력변동이 부분 예 혼합 화염의 배출특성에 미치는 영향을 조사하였다. 배출특성의 기구를 해명하기 위하여 압력지수, 속도지수, 당량비의 변화에 따른 화염평균온도, 화염길이 등을 측정하였고, 화염을 가시화 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 장치는 크게 연소실 압력을 조절하는 부분과 혼합기를 공급하는 부분으로 나눌 수 있다.

연소실 압력을 형성할 때 두 가지 상반된 유동 형태를 가진다. 연소실내 대기압 이상의 압력을 형성할 경우, 연소실 입구에서 공기를 공급하고 출구밸브를 조절하여 압력을 형성하고, 대기압 이하의 압력을 형성할 경우, 출구부에서 연소실의 공기를 외부로 배출하고 입구밸브를 조절하여 압력을 형성하게 된다. 연소실에 공급되는 공기

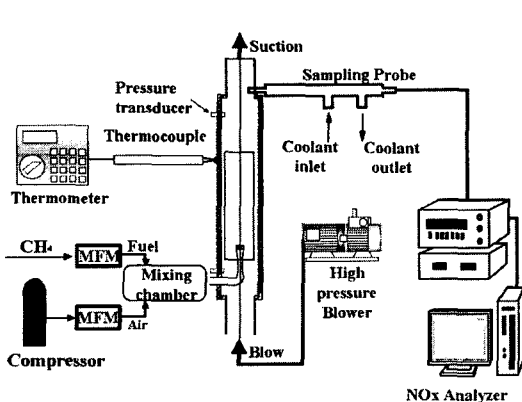


Fig. 1 Experimental setup of combustion system

는 층류유량계(SOKKEN LFE-50B)를 통하여 계측되어지고, 게이트 밸브로 제어하여 연소실 압력을 조절하였다.

혼합기를 공급하는 부분은 공기와 연료를 제어하는 부분으로 구성된다. 공기와 연료는 질량유량계를 거쳐 혼합실로 공급되어 다양한 당량비의 혼합기를 생성한다. 혼합실내에는 steel ball과 허니콤을 설치하여 혼합기의 유동을 정류하였고, 역화를 방지하는 기능으로도 사용되었다. 다양한 압력 변화에 대해 안정적인 화염 형성을 위해 디퓨저와 파일릿 화염용 인젝터가 부착된 보염기를 사용하였다.

Fig. 2는 실험에서 사용한 연소기와 디퓨저를 상세히 나타낸 것이다. 연소기는 가로 55mm 세로 55mm 높이 550mm인 사각 파이프 형태이며, 화염장의 온도 계측용 프로브를 삽입하기 위하여 10mm 간격의 측정 홀을 가지는 스테인레스 판 5종류를 사용하여 실제 공간 분해능은 2mm인 프로브 삽입 구멍(d= 5mm)을 설치하였다.

디퓨저는 혼합가스의 분사압력과 분사속도를 낮추고 대기압이하의 조건에서 화염의 안정 영역을 넓히기 위해 사용하였다. 보염기는 압력 변동에 대하여 화염의 안정화를 위해 중심 출구(d=8mm)를 중심으로 반경 1.5mm인 보조 인젝터를 8개 설치하여 파일릿 화염을 형성하였다. 실험에서 연료는 순도 99.99%의 메탄(CH₄)을 사용하였으며 연소용 공기로는 습기가 제거된 압축 공기를 사용하였다.

2.2. 실험조건

실험에서 화염의 구조 변화와 배출특성을 관찰하기 위하여 당량비, 압력지수, 속도지수를 조절

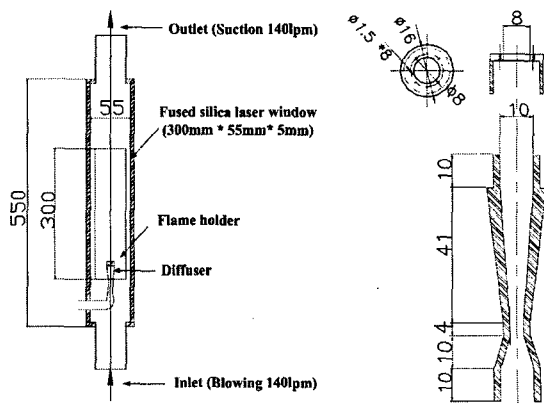


Fig. 2 Combustor, diffuser and flame holder

Table 1 Experimental conditions of mixture

Equivalence ratio. ϕ	Air condition	Pressure index(P^*)
0.9 ~ 1.2	Suction	0.7
		0.8
		0.9
	Suction + Blow	1
	Blow	1.1
		1.2
1.3		

하였다. 당량비는 연료와 공기량을 조절하여 0.9~1.2까지 다양하게 형성하였다. 압력지수는 각 당량비 조건에서 0.7~1.3까지 조절하였다. 압력은 연소실 입출구부 100mm 지점에 압력센서를 설치하여 측정하였고, 본 연소시스템에서는 P^* 가 0.7 이하, 1.3이상의 조건에서 연소실 내부압력이 약하게 진동하여 정압조건을 유지하기 힘든 조건이 존재하였으므로, 본 연구에서는 P^* 가 0.7 이상, 1.3이하의 조건에서 실험을 수행하였습니다. 압력지수는 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$P^* = \frac{P_{abs}}{P_{atm}} \quad (1)$$

속도지수는 혼합기의 유속과 주위공기류의 유속에 따라 0.5~2.0m/s 까지 조절하였다. 주위공기류의 속도 1.0m/s의 조건을 기준으로 속도지수는 혼합기의 유속을 변화 시키는 경우와 혼합기의 속도 1.0m/s의 조건을 기준으로 주위공기류의 유속을 변화시키는 경우로 나눌 수 있다. 식 (2)와 같이 속도지수를 정의하였다.

$$U^* = \frac{U_M}{U_S} \quad (2)$$

실험 조건은 Table 1과 2에 나타내었다

2.3 실험방법

2.3.1 가연한계측정

연소실 압력변동에 따른 화염의 가연한계를 조사하기 위하여 각 압력조건에서의 공급 혼합기 유량을 측정하였다. 화염이 부상하여 소화될 때까지의 최대 혼합기량을 가연한계라 하였다.

2.3.2 화염의 가시화

화염장의 가시화를 위하여 직접사진과 슬리렌

Table 2 Velocity and Flow rate

Mixture		Surrounding air	
Velocity	Flow rate	Velocity	Flow rate
U_M (m/s)	(lpm)	U_S (m/s)	(lpm)
0.5	5.3	0.67	93.8
1.0	10.6	1.0	140
1.5	15.9	2.0	280

사진을 촬영하였다. 직접사진은 셔터속도 1/2000sec로 촬영하여 정지화면을 취득하여 화염의 평균길이와 형상을 분석하였다. 슬리렌 사진은 고속카메라(Vosskuhler INSTRUMENTS : HCC-1000)를 이용하여 1000 frames/s 촬영하여 화염의 유동 형태를 관찰 하였다.⁽¹²⁾

2.3.3 배기가스 분석

배기가스 중의 질소산화물(NO_x)의 농도를 측정하기 위해서 화학 발광식 가스 분석기(TELEDYNE INSTRUMENTS : M200AH)를 사용하였다. 질소산화물(NO_x)의 측정을 위하여 스테인리스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 막기 위해 수냉식 2중관을 설치하였다. 프로브의 샘플링 홀의 크기는 1mm 로 하였고, 연소가스의 포집은 내부 화염길이의 2배되는 지점에서 이루어졌다. 슬리렌 촬영을 통하여 내부화염과 주위공기류의 혼합은 연소가스 포집위치보다 하류에서 이루어짐을 확인하였다. 포집된 연소 가스는 soot와 수분을 1차적으로 실리카겔과 거즈를 통하여 여과하여 가스 분석기로 공급하였다. 이때 연소실 압력이 가변하기 때문에 진공펌프와 유량계를 이용하여 500cc/min의 연소가스를 가스 분석기에 일정하게 공급하였다.⁽¹³⁻¹⁵⁾ 측정된 값은 EINOx (Emission Index NO_x)로 표시하였다.⁽¹⁶⁾

2.3.4 화염대의 평균 온도 측정

화염 내부의 온도를 측정하기 위하여 삽입되는 열전대는(R-type)는 두께 300 μ m를 사용하였고, 세라믹제로 단열처리 되어진 2공 튜브로 소선을 분리하였다. 온도 측정위치는 압력지수와 당량비에 따른 화염길이의 1/2 지점에서 반경방향 1mm 간격으로 측정하였다. 각 지점에서 안정된 온도값

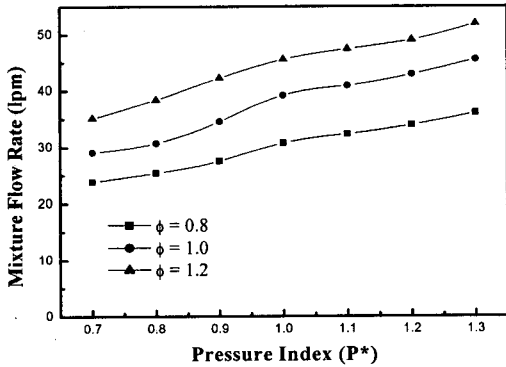


Fig. 3 Distribution of flammability limits

을 얻기 위해 5회 측정치의 평균값을 평균운도로 하였다.^(14,15)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소실 압력변동이 가연한계에 미치는 영향

Fig. 3은 부분 예혼합 화염에서 혼합기의 당량비와 압력지수의 변화에 따른 가연한계를 나타낸 것이다. 부분 예혼합 화염에서 당량비가 증가함에 따라 점차적으로 화염안정 영역이 넓어짐을 알 수 있으며, P*가 감소함에 따라 부분 예혼합 화염의 화염 안정화 영역이 서서히 좁아진다. 본 연구의 연소시스템에서 가연한계는 압력지수보다 당량비의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

3.2 연소실 압력변동이 화염형상에 미치는 영향

Fig. 4는 각각의 당량비와 압력지수에 따라 형성된 화염의 직접 사진을 나타낸 것이다. 사진에서의 화염은 이중 구조 형태를 나타내고 있다. 내염영역은 밝고 청색을 나타내며 외염영역은 휘도가 낮은 청염이 나타난다. 보염기에서 분사된 미연혼합기는 내염영역에서 1차 연소반응을 일으키고, 일부 미연성분은 외염영역에서 주위 공기와 2차 연소반응을 일으켜, 전체적으로 2중 화염구조가 나타나게 된다. 외염보다 내염에서 연소실 내부 압력의 영향을 많이 받는 것을 관찰할 수 있다. 사진에서 화염길이는 P* < 1 조건에서 P* ≥ 1 조건보다 상대적으로 화염 길이가 신장된 것을 관찰할 수 있다. 전체적으로 P* ≥ 1 인 조건에서는 화염대가 선명하게 나타나고, P* < 1 조건은 화염형태가 선명하지 못하고 화염면이 넓게 분포하며 화염의 하류부가 둥근 형상을 나타낸

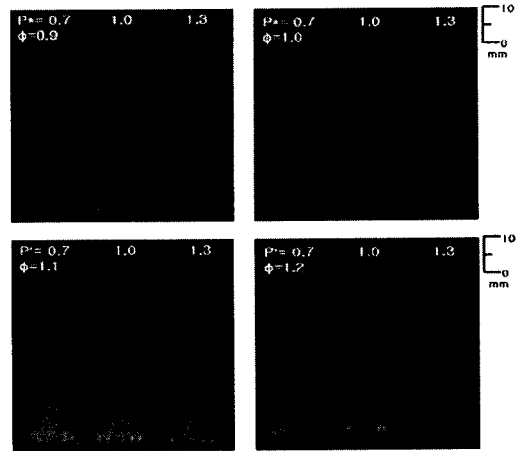


Fig. 4 Direct photograph of flame as function of pressure index and equivalence ratio

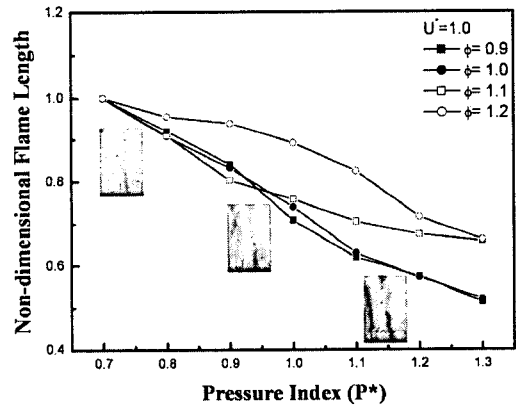
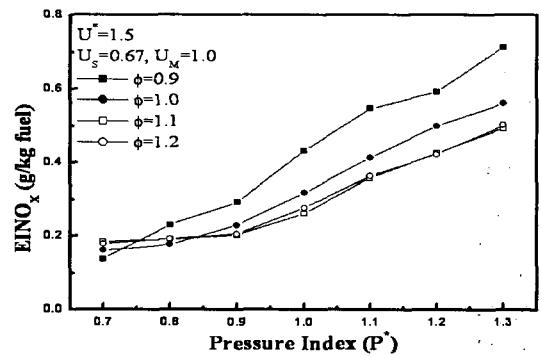
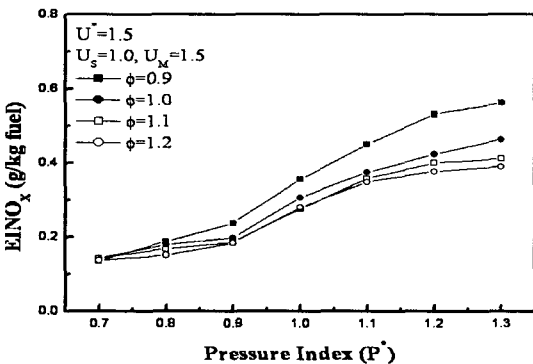
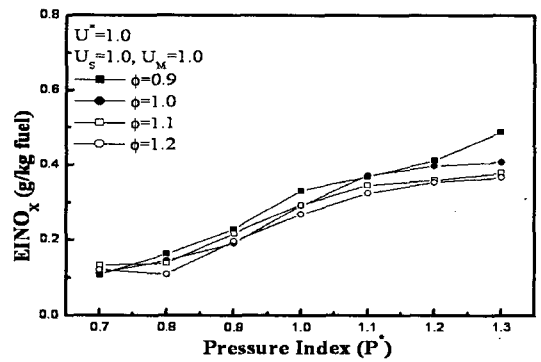
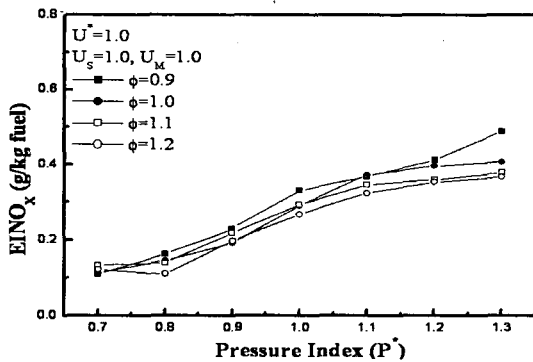
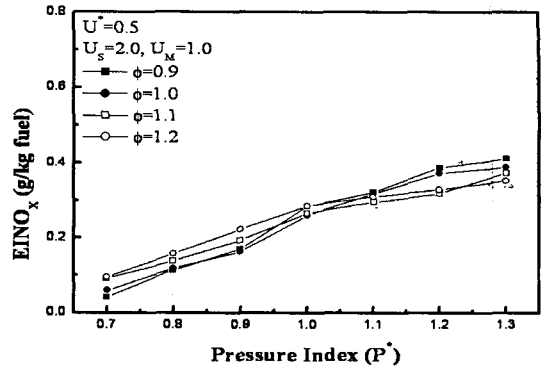
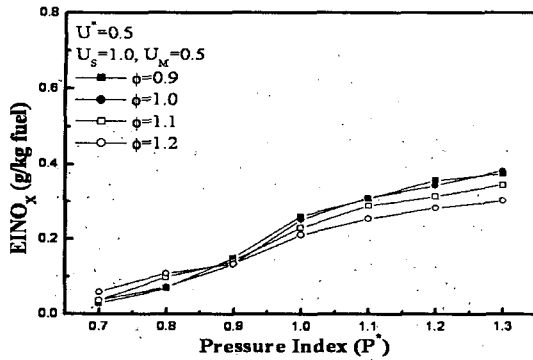


Fig. 5 Flame length as function of pressure index

다. 당량비가 낮은 화염이 당량비가 높은 화염보다 상대적으로 압력의 영향을 크게 받는다. P* < 1 조건에서 화염이 길어지고 넓어지면 화염대의 피크온도가 낮아져, 국소고온영역이 감소하고 균일한 온도분포가 형성되어 Thermal NOx가 감소할 것으로 기대된다. Fig. 5는 당량비와 압력지수 변화에 따른 내염 길이를 나타낸 것이다. 전체적으로 당량비가 증가함에 따라 내염 길이가 증가하는 경향이 나타난다. P* ≥ 1 조건에서는 화염길이에 큰 변화가 관찰되지 않으나, P* < 1 경우, 상대적으로 화염길이의 변화가 크게 나타나고 있다. 동일한 당량비와 속도지수에서 압력지수 변화에 대한 화염길이는 최대 30~40% 정도 차이가 난다. 상대적으로 희박한 조건에서 화염길이의 변화율이 크게 하였다. 이는 앞의 화염의 형태에서



(a) Mixture velocity control

(b) Surrounding air velocity control

Fig. 6 Distribution of NOx Concentration with the variation of pressure index and velocity index.

언급한 바와 같이 회박연소조건에서 압력구배의 영향을 크게 받기 때문이다.

3.3. 연소실 압력변동에 따른 질소산화물(NOx) 배출특성

Fig. 6은 각 실험조건에 따른 EINOx를 나타낸 것이다. EINOx는 전체적으로 압력지수에 비례하는 경향을 나타내었다. 본 연구의 조건에서 연소실 내부 압력을 대기압 이하로 조금만 변화를 주

어도 NOx 제어에 큰 효과를 기대할 수 있다는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 6(a)는 혼합기 유속을 제어하여 속도지수를 변화하는 경우 EINOx를 나타낸 것이다. U*가 0.5→1.5로 증가함에 따라 NOx 발생량이 20~35% 정도 단조 증가하는 현상을 나타내었고, 상대적으로 회박조건에서 U*의 증가에 따른 NOx 배출량의 증가율이 높게 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 6(b)는 주위공기류 유속을 조절하여 속도 지수를 변화하는 경우의 EINO_x를 나타낸 것이다. 전체적으로 Fig. 6(a)의 혼합기 유속을 변화시킨 경우와 유사한 분포를 나타내고 있으며, U*가 0.5 → 1.5로 증가함에 따라 NO_x 발생량이 25~45% 증가하는 것을 관찰 할 수 있었다. 위의 결과로부터 주위공기류와 혼합기 유속을 변화시킨 경우간의 NO_x 배출량은 다소 차이가 있으나, NO_x 배출에 미치는 영향을 U*로 무차원화 하여 설명 가능함을 알 수 있다.

전체적으로 압력지수가 낮아짐에 따라 NO_x 배출량이 감소하는 현상을 보이고 있다. 이것은 대기압 이하의 압력 조건에서는 화염두께와 화염길이의 신장으로 반응대의 고온영역이 감소하여 Thermal NO_x 배출량이 감소된 것으로 사료된다. 한편 NO_x 배출에 미치는 영향을 U*로 무차원화 하여 설명할 수 있음을 알 수 있다. 연소실 압력의 변화에 따른 화염온도의 변화를 조사하기 위해 화염의 평균 온도 분포를 측정하였다.

3.4 연소실 압력변동에 따른 평균온도 분포특성

Fig. 7은 동일한 당량비에서 압력지수에 따른 평균온도분포를 나타낸 것이다. 평균온도는 실험 조건에 따른 화염길이의 1/2 지점에서 반경 방향으로 측정하였다. P* ≥ 1 경우, 좁은 고온 영역이 나타나며, P* < 1 경우는 화염신장으로 인해 전체적인 온도장이 균일하게 분포함을 관찰할 수 있다. 전체적으로 반경방향의 온도분포가 완만한 변화를 보이는 조건(P* < 1)과 반경방향 6mm 부근에서 급변하는 조건(P* ≥ 1)로 양분할 수 있다. 이러한 두 그룹간의 온도차는 회박조건에서 크게 나타나고, 당량비가 증가할수록 작아진다. 따라서 온도분포에서도 회박 연소 조건에서 연소실 내부 압력의 영향이 큰 것을 관찰 할 수 있다.

각 당량비의 온도분포를 보면 P*가 0.9~1.0 사이에서 온도분포가 급변하는 것을 볼 수 있다. 이는 앞의 EINO_x 분포에서 P*가 0.9~1.0 사이에서 급변하는 현상을 뒷받침 해준다.

Fig. 8은 동일 당량비에서 압력지수 변화에 따

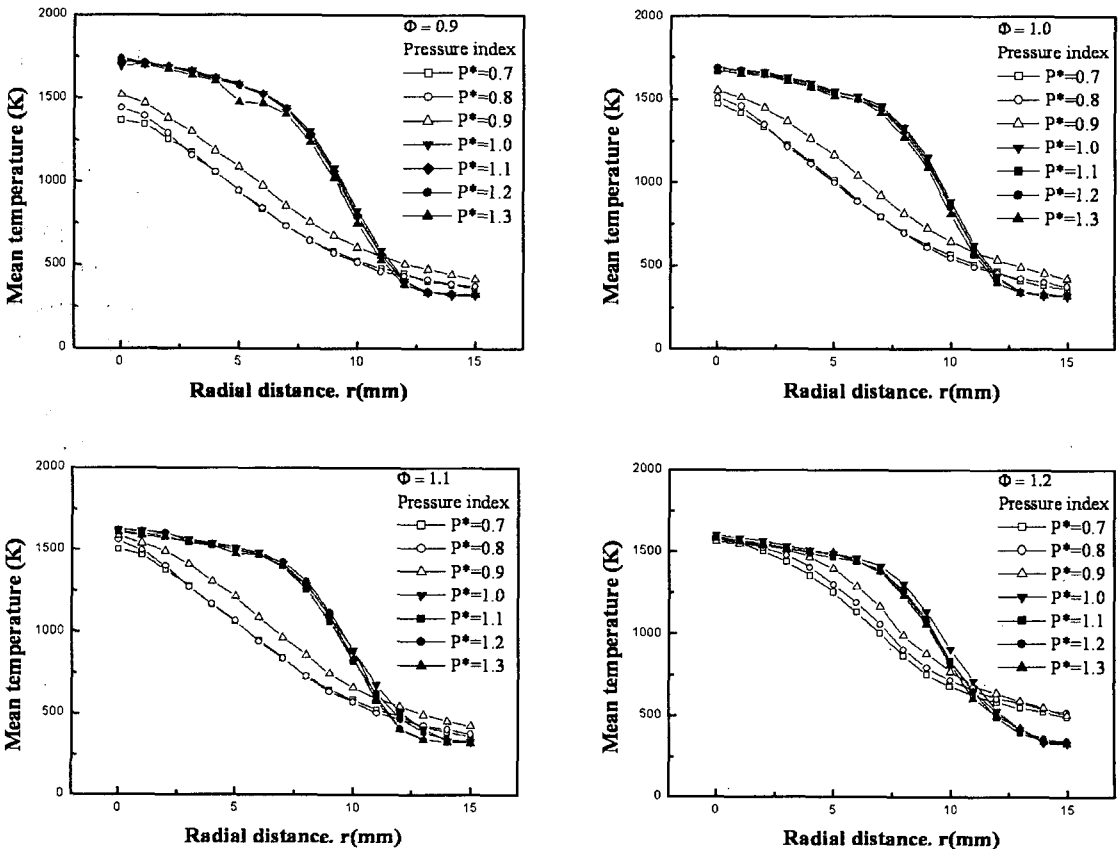


Fig. 7 Distribution of temperature with the variation of pressure index

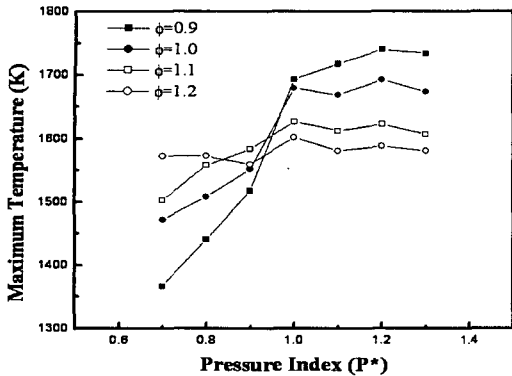


Fig. 8 Distribution of maximum temperature as function of pressure index

른 중심축 방향 최고온도를 나타낸 것이다. $P^* \geq 1$ 영역에서는 $\phi=0.9$ 조건에서 최고 온도가 나타나는 것을 관찰할 수 있고, $P^* < 1$ 영역에서는 $\phi > 1.0$ 조건에서 온도분포가 높게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이는 $P^* < 1$ 로 감소되면서 과농 조건의 미연혼합기와 주위공기의 확산현상이 촉진되기 때문이라 생각된다. 최고온도분포에서도 당량비가 낮을 수록 연소실 압력변동의 영향을 크게 받음을 알 수 있으며 압력지수 0.9~1.0 사이에서 온도변화가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 급격한 온도변화의 원인을 조사하기 위하여 고속 슐리렌 사진 촬영을 수행하였다.

Fig. 9는 압력지수에 따른 슐리렌 사진을 나타낸 것이다. $P^*=1$ 조건에서는 시간변화에 따른 화염형상의 변화를 관찰할 수 없으나, $P^*=0.97$ 로 감소하면서 보염기 선단부분에서 진동이 발생하는 것을 관찰 할 수 있고, 압력지수가 낮아질수록 보염기 주변의 진동 강도와 크기가 격렬해지는 것을 관찰 할 수 있다. 이때 내염은 진동 강도와 크기에 따라 폭이 좁고 긴 화염에서 끝이 깨진 화염으로 주기적으로 반복하는 것을 관찰 할 수 있다. 연소장내 주기적인 진동은 주위공기의 유입을 촉진시켜 화염면의 온도를 저하하여 저 NOx 현상이 예상되어진다. 이와 같은 현상은 Whitlow⁽⁶⁾ 등의 진동에 의한 저 NOx 연소현상과 유사한 결과로 사료된다.

이러한 $P^* < 1$ 조건의 주기적인 진동에 의해 상대적으로 균일한 평균온도분포가 얻어진 것이고, 압력지수 0.9~1.0 사이에서 급격한 온도변화 또한 이러한 현상에 기인한다고 사료된다.

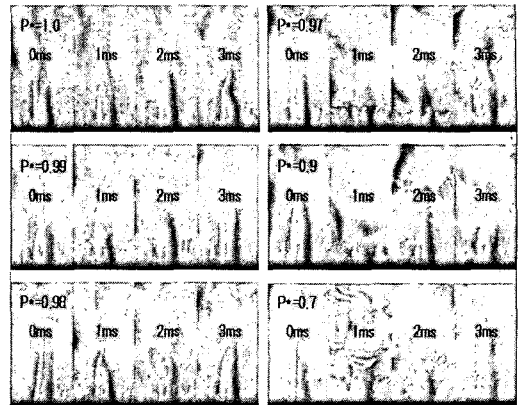


Fig. 9 Variation of schlieren photograph as function of pressure index & time series

4. 결 론

본 연구에서는 연소실 내부 압력의 변화에 따른 부분 예혼합 화염의 배출특성과 화염구조를 조사하기 위하여 NOx 배출량, 평균온도분포 및 화염의 가시화, 화염길이를 측정하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 평균온도분포에서, $P^* \geq 1$ 경우는 좁은 고온영역을 나타내는 반면, $P^* < 1$ 조건은 상대적으로 완만하고 균일한 온도 분포를 나타내었다.
- (2) NOx 배출량은 압력지수와 비례하는 경향을 나타내었고, 대기압이하의 조건에서 저 NOx연소가 실현되었다. 이는 대기압 이하 압력조건에서는 화염신장으로 화염면이 넓어져 화염반응대의 고온영역이 감소하였기 때문이다.
- (3) P^* 가 0.97부터 진동이 발생하여 주위 공기의 유입이 증가하여 화염면의 온도저하로 저 NOx현상을 촉진되었다.
- (4) 연소실 분위기 압력을 조절함으로써 배출특성 제어가 가능함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 에너지관리공단 학술진흥사업의 지원에 의하여 연구 되었습니다(2004-E-ID03-P-02-0-000).

참고문헌

- (1) Toshio Shudo and Takashi Mizuide, 2002, "NOx

- Emission Characteristics in Rich-Lean Combustion of Hydrogen," *JSAE Review* 23, pp. 9~14.
- (2) BRADLEY, D., GASKELL, P. H., GU, X. J., LAWES, M. and SCOTT, M. J., 1998, "Premixed Turbulent Flame Instability and NO Formation in a Lean-Burn Swirl Burner," *COMBUSTION AND FLAME* 115, pp. 515~538.
- (3) Ballester, J. M., Dopazo, C., Fueyo, N., Hernabdez, M. and Vidal, P. J., 1997, "Investigation of Low-NOx Strategies for Natural Gas Combustion," *Elsevier Science Ltd. Fuel*, Vol. 76, No. 5, pp. 435~446.
- (4) Smart, J. P. and Webber, R., 1989, "Reduction of NOx and Optimisation of Burnout with an Aerodynamically Air-Staged Burner and Air-Staged Precombustor Burner," *Journal of the Institute of Energy*, pp. 237~245.
- (5) Ahn, K. Y., Kim, H. S., Cho, E. S., Ahn, J. H. and Kim, Y. M., 1999, "An Experimental Study on Combustion Processes and NOx Emission Characteristics of the Air-Staged Burner," *KSME*, Vol. 13, pp. 477~486.
- (6) POPPE, C., SIVASEGARAM, S. and WHITELAW, J. H., 1998, "Control of NOx Emissions in Confined Flames by Oscillations," *Combustion and Flame*, Vol. 113, pp. 13~26.
- (7) Liakos, H.H., Founti, M.A. and Markatos, N.C., 1999, "The Relative Importance of Combustion Mechanisms in Industrial Premixed Flames Under High Pressure," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20, pp. 925~940.
- (8) Soike, A., Dinkelacker, F. and Leipertz, A., 2001, "Pressure Influence on the Flame Front Curvature of Turbulent Premixed Flame: Comparison Between Experiment and Theory," *Combustion and Flame*, Vol. 132, pp. 451~462.
- (9) Metghalchi, M. and Keck, J.C., 1980, "Laminar Burning Velocity of Propane-Air Mixtures at High Temperature and Pressure," *Combustion and Flame*, Vol. 38, pp. 143~154.
- (10) Metghalchi, M., 1982, "Burning Velocities of Mixtures of Air with Methanol, Isooctane, and Indolence at High Pressure and Temperature," *Combustion and Flame*, Vol. 48, pp. 191~200.
- (11) DOUGLAS THOMSEN, D., 1999, "Modelling of NO Formation in Premixed, High-Pressure Methane Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 119, pp. 307~318.
- (12) Choi, B. R., Choi, G. M. and Chang, I. G., 1996, "An Experimental Study on Characteristics of Mixture Turbulence and Flame Scale," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 20, No. 3, pp. 1040~1049.
- (13) LEE, T.-W. and WANG, T., 2000, "Temperature, Velocity and NOx/CO Emission Measurements in Turbulent Flames: Effect of Partial Premixing with Central Fuel Injection," *Combustion and Flames*, Vol. 121, pp. 378~385.
- (14) Koji Hase and Yasumichi Kori, 1996, "Effect of Premixing of Fuel Gas and Air on NOx Formation," *Fuel*, Vol. 75, pp. 1509~1514.
- (15) Poppe, C., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J. H., 1998, "Control of NOx Emission in Confined Flames by Oscillations," *Combust. Flame*, Vol. 113, pp. 13~26.
- (16) STEPHEN R. TURNS and FRANKLIN H. MYHR, 1991, "Oxides of Nitrogen Emission from Turbulent Jet Flames: Part I - Fuel Effects and Flames Radiation," *Combustion and Flames*, Vol. 87, pp. 319~335.
- (17) Nogueira, M.F.M. and Fisher, E.M., 2003, "Effect of Dimethyl Methylphosphonate on Premixed Methane Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 132, pp. 352~363.
- (18) Linda G. Blevins and Jay P. Gore, 1999, "Experimental Study Temperature and Ch Radical Location in Partially Premixed CH₄/Air Coflow Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 118, pp. 684~696.
- (19) Hideaki Kobayaski, 2002, "Experimental Study of High-Pressure Turbulent Premixed Flames," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, pp. 375~387.
- (20) Higgins, B. and Candel, S., 2001, "An Experimental Study on the Effect of Pressure and Strain Rate on OH Chemiluminescence of Premixed Fuel-lean Methane/Air Flames," *Fuel*, Vol. 80, pp. 1583~1591.